

流域尺度氮流失的环境风险评价

陈能汪, 洪华生, 张珞平

(厦门大学 环境科学研究中心 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 采用故障树及概率分析方法,对九龙江流域氮的流失风险进行定性及定量评价.通过建立故障树定性分析了九龙江流域氮流失的主要风险来源.结果表明,氮流失风险大小主要与肥料施用、畜禽养殖废物的处置及农田耕作有关.在 GIS 技术支持下,通过土地利用、土壤等数据的计算,结合田间调查结果与专家意见,确定故障树基本故障事件概率,继而对氮流失风险进行定量评价.最佳管理措施模拟评价结果表明,降低施肥水平,在养殖场周边建立植被过滤带,增加河岸林截留入河沉积物等措施可以有效降低氮流失风险,在九龙江流域可以考虑优先实施.

关键词: 九龙江流域; 氮流失; 概率风险评价

中图分类号: X820.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 6929(2006)01 - 0010 - 05

Watershed Level Risk Assessment of Nitrogen Discharge Using Probabilistic Risk Assessment Tools

CHEN Neng-wang, HONG Hua-sheng, ZHANG Luo-ping

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Probabilistic risk assessment (PRA) for the discharge of excess nitrogen was conducted for Jiulong River watershed, an agricultural watershed in Southeast China. Using fault tree analysis, the probability of occurrence for excessive nitrogen discharge to the river during a runoff event was qualitatively evaluated. It was showed that the risk of excess nitrogen discharge was mainly related to crop and livestock practices in the watershed. Under the support of GIS, land use, soil type, management practices and expert opinions were used to determine probabilities of individual events within the fault tree and to calculate the overall probability of excess nitrogen discharge during a runoff event. The results of simulation and assessment of optimal management measurements indicated that alternative practices, such as reducing fertilization, installing vegetative strip buffer around the pig farms, and installing more riparian buffers, have a greater potential of reducing the risk of excess nitrogen discharge during a runoff event and can be implemented in priority in Jiulong River watershed.

Key words: Jiulong River watershed; nitrogen discharge; probabilistic risk assessment

流域农业非点源污染造成的水环境污染已相当普遍,成为亟需解决的重大环境问题^[1-3].流域管理决策正试图通过实施最佳管理措施(BMPs)来减少农业非点源污染.有效的营养盐规划及BMPs的优选研究仍处在起步阶段^[4].对于氮的流失风险进行识别评价成为目前的研究重点,其最常用的方法是模型模拟,如利用AGNPS模型识别氮流失关键源区^[5-6],在GIS支持下对不同土地利用类型流域的氮输出风险进行模拟评价^[7].模型模拟评价需要费时费力的监测工作,且难以被非专业人员的管理者与决策者使用.用故障树分析法评价环境风险,可以很好地解决上述问题.该方法既适用于定性分析,又适用于定量分析,具有应用范围广、简明和形象等特点,它主要通过评估事件的发生概

率以及在不同概率下事件后果的严重性,决定适宜采取的对策^[8].

笔者对福建省九龙江流域营养盐氮流失进入水体引起的环境风险进行评价,旨在通过对潜在环境风险的定性与定量分析,阐明氮流失发生的环节及其风险大小,为有效地避免这种风险危害,制定流域农业非点源污染风险管理决策方案提供依据.

1 研究区概况

福建省九龙江流域地处东南沿海经济发达地区,面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$,人口约 250×10^4 人.目前,在工业点源排放有所控制的同时,流域内规模与散养并存的畜禽养殖业不断扩张,产生了大量的畜禽粪污,再加上过量施用化肥以及村庄生活污水、垃圾污染未能得到处理处置,致使大量营养盐氮流失进入九龙江.作为厦门、漳州、龙岩3个市引用水源的九龙江,其日趋恶化的水环境问题引起了从政府、学者到流域内居民的高度关注.

收稿日期: 2005 - 01 - 06

基金项目: 福建省“十五”重大科技攻关计划项目(2002H009)

作者简介: 陈能汪(1976 -),男,福建德化人,博士研究生.

2 评价方法与步骤

风险是指遭受损失、损害、毁害的可能性. 笔者所指的环境风险评价是在流域尺度上描述和评估环境污染、人为活动对生态系统及其组分产生不利作用的可能性和大小的过程. 流域营养盐氮的排放风险具有影响范围大(区域性)、时间长的特点,是一个复杂的系统. 笔者将故障树分析法用于环境风险评价,主要是用于计算最大顶上事件发生的概率. 用故障树分析法进行环境风险评价的过程是: 熟悉评价系统,充分了解、全面认识系统结构和环境状况. 调查研究,对该系统或类似该系统发生过事故的各种因素进行调查和分析. 编制故障树. 从顶上事件开始,逐级地找出所有直接发生原因事件,一直分析到最基本故障事件为止,按照它们的逻辑关系用逻辑门连接上、下层事件,并做成故障树. 故障树分析. 确定基本故障事件发生的概率,并计算出顶上事件发生的概率. 通过故障树判别哪些事件可以做调整,如改变农业耕作管理措施,从而改变其发生的概率,以降低顶上事件发生的概率,直至达到可接受水平.

3 风险分析与定量

从世界范围来看,河口地区海域富营养化现象与入海河流大量营养盐氮的输送有关. 厦门海域近年来赤潮频繁发生,与福建省第二大江——九龙江营养盐的大量输送不无关系. 通过 2002—2004 年对九龙江流域的定点试验、监测分析与调查研究,大量营养盐氮进入九龙江向河口输送的主要原因如下:

a. 畜禽养殖污染. 近年来在农业结构调整和市场

经济驱动下,养殖场规模及养殖数量均呈扩张趋势. 2002 年流域内 3 000 头以上的生猪养殖场有 16 个, 5 000 头以上的有 4 个, 1×10^4 头以上的有 3 个, 存栏总计约 280×10^4 头,另外还有相当数量的牛、羊、鸡等畜禽. 养殖场主要分布在沿江两岸,大部分采用水冲式清粪,粪污量大. 除少数较大规模养殖场建有沼气池、生化塘外,大部分养殖场的粪污在降雨冲刷下进入九龙江.

b. 过量施用化肥. 作为福建东南特色农业带的九龙江流域,农业种植以蔬菜、花卉、水果为主,化肥施用水平很高,九龙江流域氮的输入量远大于其农作物的产出量^[9],加上农民不合理的施肥方式、施肥时间,过剩的营养盐氮大量流失. 2003 年通过对典型小流域出口水质降雨及非降雨期的定点监测发现,化肥施用水平与径流中总氮、总磷浓度有很强的相关性^[10].

c. 生活污染. 流域内广大农村地区居民居住分散,大量的生活污水随意排放,呈现非点源污染的特点,生活污水中总氮、总磷浓度很高,对九龙江的水质影响也较大^[11].

基于上述对九龙江流域营养盐氮流失状况的分析,将顶上事件“降雨发生时过量的氮流失进入九龙江”进行逐层分析,建立故障树,如图 1 所示. 在这里,“过量的氮”指的是因为人为活动,如耕作、养殖等引起的,并未考虑自然条件下所发生的氮流失,因此这种过量是可以控制和避免的. 此外,强调降雨发生时,也是因为营养盐进入河流要有一个迁移机制,风险评价考虑的是事故事件,因此笔者只考虑降雨事件引起的径

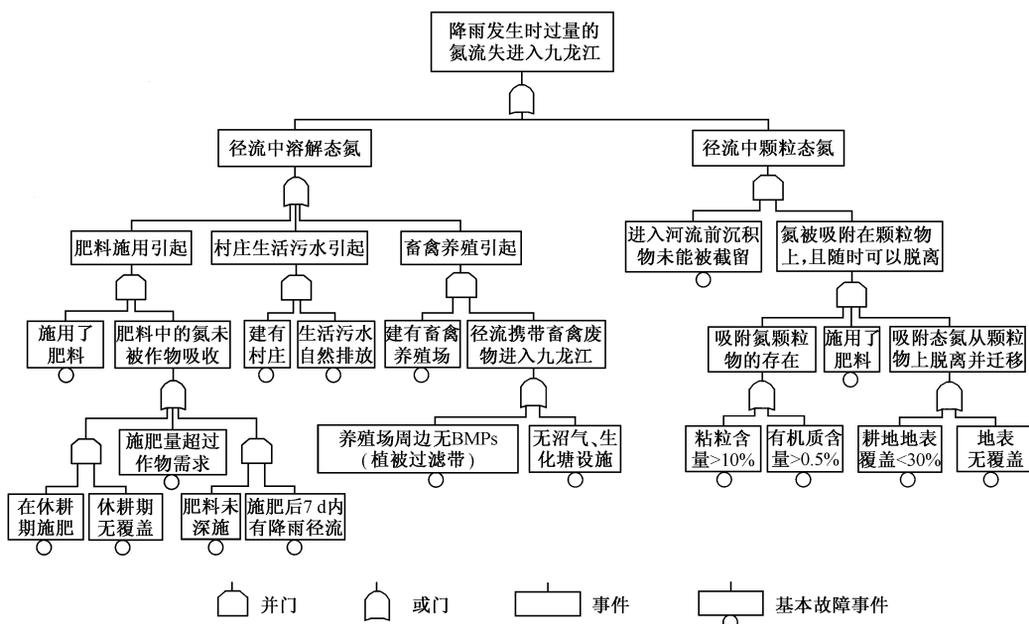


图 1 降雨发生时过量的氮进入九龙江的故障树

Fig. 1 Fault tree for the discharge of excess nitrogen to Jiulong River during a rainfall event

流机制产生的营养盐氮流失,而非日常的氮流失.同时,所指的营养盐氮流失,从物理形态上将其划分为溶解态与颗粒态两部分,并分析出引起这两部分氮流失的下一层逻辑原因事件,直至基本故障事件.

营养盐氮流失风险的定量评价同样以故障树为基础.定量目标是确定顶上事件——降雨发生时过量的氮流失进入九龙江发生的概率.

基本故障事件概率的确定依据主要是:土地利用;化肥施用;土壤调查资料;水质监测数据;专家意见.参比国内外同类研究计算方法,大部分基本故障事件的发生概率是在 GIS 支持下,根据基本故障事件涉及的面积或时间的比例确定,也有根据是否有 BMPs 进行确定.

在各基本故障事件发生概率确定以后,根据概率论计算原理,从基本故障事件开始,逐层计算各逻辑门的发生概率,直至顶上事件的发生概率.主要计算公式见式(1),(2),(3).

$$P(X \cap Y) = P(X) \times P(Y) \quad (1)$$

$$P(X \cup Y) = P(X) + P(Y) - P(X \cap Y) \quad (2)$$

$$P(X \cup Y \cup Z) = P(X) + P(Y) + P(Z) - P(X \cap Y) - P(X \cap Z) - P(Y \cap Z) + P(X \cap Y \cap Z) \quad (3)$$

4 结果与讨论

4.1 定性评价

如图 1 所示,故障树显示的基本故障事件主要涉及作物、养分、畜禽养殖管理及土壤本身的特性等.

a. 引起溶解态氮流失的原因有 3 个: 由施用肥料(包括无机肥与有机肥)引起.在耕地上施用了肥料,且未被作物吸收.未被作物吸收的原因可能是超过了作物生长需求,或者是在无作物留茬的休耕期施肥,或者是采取表施未深施的方式施肥且短期内(一般指 7 d)有降雨径流. 由畜禽养殖过程引起.建有养殖场,无 BMPs 对径流营养盐进行有效截留,或者未建沼气池、生化塘等粪污处理设施. 由村庄生活污水的自然排放引起.九龙江流域人口高达 250×10^4 人,其中 80% 居住在农村,村镇建设缺乏规划,住宅分散,没有下水道,生活污水多为居民生活杂排水和尿液,含有大量氮的污水从屋外水沟进入水体.

b. 引起颗粒态氮流失的原因是在没有 BMPs 截留沉积物的情况下,氮吸附在颗粒物表面且在降雨冲刷下进入径流,最终进入九龙江.发生这种事故风险与土壤质地、有机质含量及地表有无覆盖物有关.

4.2 定量评价

概率确定结果见表 1.由表 1 可知,九龙江流域氮流失的基本故障事件的发生概率均为 0~1,概率为 1 时表明该事件肯定发生,如九龙江流域内村庄生活污水未经处理自然排放,所以其发生概率为 1.

表 1 九龙江流域营养盐流失基本故障事件发生概率确定

Table 1 Probabilities of individual events assigned for the Jiulong River watershed, basis for calculation and data source

代码	基本故障事件	事件概率 (P) ¹⁾	确定方法	文献源
A	施用肥料	0.175	农业用地比例	[12]
B	在休耕期施肥	0.11	施肥农业用地比例	[12]
C	休耕期无覆盖	0.24	农业用地比例	[12]
D	施肥量超过作物需求	0.75	施肥农业用地比例	[12—13]
E	肥料表施,未深施	0.85	施肥农业用地比例	[12]
F	施肥后 7 d 内有降雨径流	0.60	时间比例	[12]
G	建有村庄	0.03	面积比例	[12]
H	生活污水自然排放	1	是/否	[12]
I	建有畜禽养殖场	0.15	面积比例	[14—15]
J	养殖场周边无 BMPs(植被过滤带)	0.95	是/否	[12]
K	无沼气池、生化塘设施	0.60	是/否	[12]
L	粘粒含量 > 10 %	1	是/否	[13]
M	有机质含量 > 0.5 %	1	是/否	[13]
N	耕地地表覆盖 < 30 %	0.58	耕地比例	[12]
O	地表无覆盖	0.06	面积比例	[12]
P	没有 BMPs 截留入河沉积物	0.85	农业用地比例	[12]

1) 为 2002 年.

根据表 1 及式(1),(2),(3)计算,顶上事件“降雨发生时过量的氮流失进入九龙江”发生概率为 0.363,其中溶解态氮的流失概率为 0.30,均处于较高水平,表明氮流失可能性较大.

针对九龙江流域现状及今后发展趋势,构建了系列 BMPs,确定相应基本故障事件概率的变化,再分别计算溶解态氮流失、颗粒态氮流失和顶上事件的发生概率,计算结果见表 2.

表 2 降雨发生时过量的氮流失进入九龙江的发生概率

Table 2 Probability of excess nitrogen discharge to Jiulong River during a rainfall event

采取措施	代码	BMPs 方案构建	基本故障 事件代码	概率变 化模拟	溶解态氮 流失概率	颗粒态氮 流失概率	过量氮 流失概率	边际 概率
未采取 BMPs ¹⁾					0.30	0.09	0.363	
	B1	施肥量下降	D	0.75 0.50	0.28	0.09	0.347	0.064
	B2	肥料深施	E	0.85 0.50	0.29	0.09	0.356	0.020
	B3	调整施肥时间	F	0.60 0.30	0.29	0.09	0.354	0.030
	B4	生活污水处理	H	1 0.50	0.29	0.09	0.353	0.020
	B5	增加畜禽养殖	I	0.15 0.30	0.42	0.09	0.473	
采取 BMPs	B6	养殖场周边建有植被过滤带	J	0.95 0.20	0.26	0.09	0.329	0.045
	B7	建沼气池、生化塘设施	K	0.6 0	0.30	0.09	0.360	0.005
	B8	截留入河沉积物	P	0.85 0.50	0.30	0.05	0.330	0.094
	B9	B1 + B2 + B3			0.26	0.09	0.320	
	B10	B6 + B7			0.20	0.09	0.276	
	B11	B5 + B6 + B7			0.23	0.09	0.298	
	B12	B1 + B2 + B3 + B4 + B5 + B6 + B7 + B8			0.17	0.05	0.213	
	B13	B1 + B6 + B8			0.16	0.05	0.209	

1) 为 2002 年。

由表 2 可知,在实施相应 BMPs 后,氮流失的发生概率均发生变化。如调整施肥水平,施肥量超过作物需求的发生概率从 0.75 降至 0.50,则溶解态氮流失的发生概率从 0.30 降至 0.28,顶上事件的发生概率从 0.363 降至 0.347。

实施单一的 BMPs 后,概率变化不大,如肥料深施,尽管概率从 0.85 降至 0.50,但溶解态氮流失、颗粒态氮流失和顶上事件的发生概率几乎不变。同样,如果仅要求九龙江流域内所有养殖场建设沼气池、生化塘,处理畜禽废物,也几乎不能有效地降低风险。

采取管理措施的组合,则效果好得多。方案 B9 是肥料施用上的调整,包括降低施肥量,采取深施的施肥方式,同时避开降雨期。该方案对降低过量氮流失风险效果显著,其中溶解态氮的流失概率从 0.30 降至 0.26,顶上事件的发生概率也由 0.363 降至 0.320。

近年来,九龙江流域日益扩张的生猪养殖业产生大量畜禽粪污,引起了相当严重的环境污染,但同时养殖业也在很大程度上提高了农民的收入水平。如果为了降低氮的流失,而强行遏制该产业就显得不现实。在此,特别设计生猪养殖场从 2002 年的 $P=0.15$ 增加至 $P=0.30$ (方案 B5,见表 2),则氮流失的风险大大提高,顶上事件的发生概率增加了 0.110。但若同时要求所有养殖场配套建设沼气池、生化塘,同时在养殖场周边建有植被过滤带(方案 B11,见表 2),则风险控制得比较理想,顶上事件“降雨发生时过量的氮流失进入九龙江”的发生概率为 0.298,其风险比采取措施前降低了 18%。

计算顶上事件的边际概率,即用顶上事件发生概率的降低值与基本故障事件概率变化的比值表示。该值大小可大致说明实施单项 BMPs 后对降低氮流失风险的效果,边际概率大的措施其效果好于边际概率小

的。边际概率计算结果见表 2,采取 BMPs B8 (建立 BMPs 截留入河沉积物),B1 (施肥量下降)和 B6 (养殖场周边建有植被过滤带)的边际概率分别为 0.094, 0.064 和 0.045,效果较其他措施显著。方案 B13 为以上 3 项 BMPs 的组合,该方案对于降低氮的流失风险效果相当理想,溶解态氮流失概率从 0.30 降至 0.16,颗粒态氮流失概率从 0.09 降至 0.05,顶上事件的发生概率由 0.363 降至 0.209。

从基本故障事件及其发生的概率来看,引起溶解态氮流失的主要原因是:肥料的施用,包括肥料施用量、施用方式及施用时间的合理性;畜禽养殖污染,主要环节有养殖场的大小及其分布,养殖废物的处置情况。引起颗粒态氮流失的原因主要与地表覆盖物及土壤性质有关,如能保护土壤植被,增加耕地地表覆盖物,防止土壤侵蚀,则能有效减少颗粒态氮流失的可能性。

建立缓冲带(沿岸种植竹林、绿肥等)截留入河沉积物、降低施肥量、在养殖场周边建立植被过滤带等措施可以有效降低氮流失风险,在九龙江流域可以考虑优先实施。

总体情况是 BMPs 实施越多,则营养盐氮流失的风险越低,进入河流的概率大大降低。当然如何科学配置以形成 BMPs 方案,还需要进行相应的环境经济损益分析才能确定。

4.3 环境风险评价的不确定性分析

就环境风险评价的一般步骤而言,从资料的收集、风险因素的识别、评价方法的选择、参数的确定到多种风险因素的综合评价从而得到风险结果,严格说来,上述过程都带有一些客观或主观的不确定性^[16]。笔者对九龙江流域营养盐氮的流失进行环境风险评价,尽管充分考虑了不确定性的来源,尽量获取足够可靠的数

据,但仍不可避免地存在着客观与主观判断带来的不确定性。在一定程度上,不确定性是科学计算方法和预测方法固有的特性。不确定性来源大致有3个方面:数据不足;知识不足,主观判断会带来一定程度的误差;随机性和可变性。

5 结论

采用故障树及概率分析方法,在流域尺度上尝试对九龙江流域营养盐氮的流失风险进行初步评价。通过定性与定量分析,以图、表的形式,直观地将发生氮流失的原因一一展示,有利于决策者、专家,特别是居民对过量营养盐流失的环节有全面清晰的认识,也有助于今后采取相应的措施以降低流失风险。

尽管风险评价复杂、困难,但与只有通过培训才能使用模型模拟进行流域管理相比,流域环境风险评价的结论更易被人们理解与接受,可为流域综合整治及营养盐规划管理提供依据。

参考文献:

- [1] Diederik T, van der M, Auke B, et al. Agricultural nutrient losses to surface water in the Netherlands: impact, strategies, and perspectives [J]. *J Environ Qual*, 1998, 27: 4—11.
- [2] Li Y, Zhang J B. Agricultural diffuse pollution from fertilisers and pesticides in China [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39 (3): 25—32.
- [3] Hudson D, Hite D, Haab T. Public perception of agricultural pollution and Gulf of Mexico hypoxia [J]. *Coastal Management*, 2005, 33 (1): 25—36.
- [4] Heathwaite A L, Sharpley A N. Evaluating measures to control the impact of agricultural phosphorus on water quality [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39: 149—155.
- [5] Caruso Brian S. Risk-based targeting of diffuse contaminant sources at variable spatial scales in a New Zealand high country catchment [J]. *Journal of Environ Manag*, 2001, 63 (3): 249—268.
- [6] Sivertun Å, Prange L. Nonpoint source critical area analysis in the Gsselö watershed using GIS [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2003, 18 (10): 887—898.
- [7] Wickham J D, Wade T G. Watershed level risk assessment of nitrogen and phosphorus export [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 37: 15—24.
- [8] Khan F I, Husain T. Risk assessment and safety evaluation using probabilistic fault tree analysis [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7 (7): 1909—1927.
- [9] 曹文志,朱鹤健.福建农业生态系统的特性与调控[M].北京:中国农业出版社,2000.
- Cao Wenzhi, Zhu Hejian. Characteristic and control of agriculture ecosystem in Fujian province [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [10] 陈能汪,洪华生,张珞平,等.九龙江流域降雨径流污染特征研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2004,43(4):537—541.
- Chen Nengwang, Hong Huasheng, Zhang Luoping, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution caused by rainfall runoff in Jiulong River watershed [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43 (4): 537—541.
- [11] 陈能汪,张珞平,洪华生,等.九龙江流域农村生活污水污染定量研究[J].厦门大学学报(自然科学版),2004,43(增刊):249—253.
- Chen Nengwang, Zhang Luoping, Hong Huasheng, et al. Estimates of household wastewater pollutions load from Jiulong River watershed [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43 (suppl.): 249—253.
- [12] 厦门大学.九龙江流域农业非点源污染控制研究报告[R].厦门:厦门大学,2004.
- Xiamen University. Report of agricultural non-point source pollution control in Jiulong River watershed [R]. Xiamen: Xiamen University, 2004.
- [13] 福建省土壤普查办公室.九龙江流域土壤类型图[Z].福州:福建省土壤普查办公室,1991.
- Office of Overall Survey of Soil of Fujian Province. Soil map of Jiulong River watershed [Z]. Fuzhou: Office of Overall Survey of Soil of Fujian Province, 1991.
- [14] 漳州市统计局.漳州统计年鉴(2003)[R].漳州:漳州市统计局,2003.
- Statistics Bureau of Zhangzhou. Statistical yearbook of Zhangzhou (2003) [R]. Zhangzhou: Statistics Bureau of Zhangzhou, 2003.
- [15] 龙岩市统计局.龙岩统计年鉴(2003)[R].龙岩:龙岩市统计局,2003.
- Statistics Bureau of Longyan. Statistical yearbook of Longyan (2003) [R]. Longyan: Statistics Bureau of Longyan, 2003.
- [16] Bier V M. Challenges to the acceptance of probabilistic risk analysis [J]. *Risk Analysis*, 1999, 19 (4): 703—710.

(责任编辑:孙彩萍)